Оптимизация конструкции светозащитной бленды прибора звездной ориентации

О.В. Филиппова, Р.В. Бессонов, Г.А. Аванесов

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: philippova.ov@gmail.com

В статье описаны принципы построения светозащитной бленды для прибора звёздной ориентации, методы усовершенствования геометрической конструкции. Проанализированы доступные способы улучшения подавления за счет изменения технологии изготовления светозащитной бленды. Приведено краткое описание исторического пути развития конструкции светозащитной бленды и основных проблем, с которыми приходилось бороться при решении задачи обеспечения должного подавления боковой засветки.

Описана роль элементов оптического блока прибора звездной ориентации в подавлении боковой засветки. Приведены результаты исследования светозащитной системы прибора звёздной ориентации, теоретического и экспериментального определения допустимого уровня боковой засветки в зависимости от используемой аппаратуры и программного обеспечения. Описаны возможности дальнейшего совершенствования светозащитной системы с целью улучшения характеристик приборов звёздной ориентации.

Экспериментальная часть работы заключается в измерении коэффициентов диффузного рассеяния различных покрытий, коэффициента рассеяния на кромках диафрагм, коэффициентов подавления боковой засветки бленды и объектива. Проведены измерения, подтверждающие корректность построенной теоретической модели и согласующиеся с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: прибор звёздной ориентации (звёздный датчик), бленда, коэффициент подавления, распределение освещённости, боковая засветка, определение ориентации, угол засветки, кромка диафрагмы.

Развитие приборов звездной ориентации идет по пути уменьшения массогабаритных характеристик и энергопотребления при одновременном повышении точности, увеличении помехозащищенности и диапазона рабочих угловых скоростей. При этом совершенствуется как элементная база, так и алгоритмы обработки изображений участков звездного неба.

Съемка звезд с борта космического аппарата (КА) практически всегда сопровождается фоновой засветкой от объектов вне поля зрения прибора, таких как Солнце, Луна, Земля, корпус корабля и т.д. В дальнейшем будем говорить о подавлении боковой засветки от Солнца, как самого яркого источника вне поля зрения прибора. Современные приборы звездной ориентации могут работать при наличии ненулевой фоновой составляющей.

Габаритные характеристики прибора в значительной степени определяет бленда как самая громоздкая его часть. Наряду с объективом и фотоприемным устройством (ФПУ) бленда входит в состав оптического блока, который непосредственно отвечает за формирование изображения участка звездного неба.

Бленда и ее назначение. Роль элементов оптической системы звездного датчика в подавлении боковой засветки



Рис. 1. Схематическое изображение оптического блока прибора звездной ориентации с двухкаскадной блендой: 2ω – угол поля зрения прибора, φ – угол допустимой засветки

Бленда предназначена для ослабления или полного подавления потока от боковых источников света. На сегодняшний день в приборах звездной ориентации используются, как правило, круговые бленды (Якушенков и др., 1981). Принцип работы бленды состоит в многократном переотражении и поглощении света на боковой поверхности и диафрагмах.

Одним из исходных параметров для построения бленды является угол засветки – угол между оптической осью прибора и направлением на Солнце (угол φ на *рис. 1*). Как правило, современные бленды обеспечивают работоспособность приборов при угле засветки порядка 30° и более. Уменьшение минимально допустимого значения угла засветки улучшает эксплуатационные характеристики прибора, но приводит к увеличению габаритов бленды.

Основной характеристикой бленды является ее коэффициент подавления, который определяется как отношение средней освещенности входного отверстия бленды (E_D) к освещенности первой линзы объектива (E_d) при каждом угле засветки φ :

$$k_{\varphi} = \frac{E_D}{E_d} \,. \tag{1}$$

Коэффициент подавления бленды напрямую зависит от характеристик применяемых покрытий, габаритов и конфигурации бленды. Для источников, находящихся вне поля зрения камеры, объектив прибора также выполняет функции светозащитного устройства. Уровень паразитной засветки, попадающий на ФПУ, определяется системой бленда-объектив. Современные ФПУ позволяет наблюдать звезды при некотором уровне паразитной засветки, определяющимся типом ФПУ и используемым алгоритмом распознавания.

Варианты конструкции круговой бленды, их свойства

Наибольшим коэффициентом подавления и надежностью обладают двухкаскадные бленды (Якушенков и др., 1981; Аванесов и др., 1983). Особенности их конструкции заключаются в том, что свет, рассеянный на кромках диафрагм, не попадает напрямую в объектив и свет, рассеянный в бленде, достигает первой линзы объектива после минимум четырех диффузных рассеяний на поверхностях бленды¹, что снижает требования к условиям наземной отработки и эксплуатации звездных датчиков. Приведенные особенности конструирования позволяют получить коэффициент подавления 10⁸–10⁹. Это обеспечивает полное подавление боковой засветки. Однако существенным недостатком двухкаскадной бленды являются ее сравнительно крупные габариты, поэтому выбор этого вида бленды нельзя считать оптимальным.

В однокаскадной бленде гарантировано минимум два переотражения на поверхностях бленды и свет, рассеянный на кромках диафрагм, напрямую попадает в объектив. Поэтому коэффициент подавления составляет не более 10^3 – 10^5 при тех же лакокрасочных покрытиях. Для геометрического построения однокаскадной бленды необходимо задать угол засветки и ширину бленды. Тем самым однозначно задается оптимальное расположение кромок диафрагм, при этом их форма может быть разной (плоская, параболическая, коническая и др., (Якушенков и др., 1981)).

Предполагаемые дальнейшие усовершенствования приборов звездной ориентации заключаются в увеличении допустимой угловой скорости, повышении частоты обновления информации, получении более равноточной трехосной ориентации. При сохранении общего вида прибора достичь этого можно увеличением поля зрения прибора и относительного отверстия объектива. Если придерживаться конструкции двухкаскадной бленды, то, в силу правил построения, габариты бленды будут увеличиваться гораздо быстрее, чем в однокаскадном варианте. Поэтому уменьшение габаритов бленды остается одним из наиболее важных вопросов ее оптимизации.

Использующееся в современных блендах лакокрасочное покрытие, апробированное в условиях космоса, близко по своим свойствам к ламбертовской диффузной поверхности и имеет коэффициент рассеяния 3...5%. Классическая однокаскадная круговая бленда с таким покрытием обладает коэффициентом подавления 10^3-10^5 . Новые технологии нанесения светопоглощающих покрытий позволяют получить коэффициенты рассеяния порядка 1%. Таким образом, можно увеличить коэффициент подавления системы, обеспечивающей два переотражения на поверхностях бленды, приблизительно на поря-

¹ В дальнейшем будем называть поверхностями бленды ее внутреннюю боковую поверхность и все поверхности диафрагм, за исключением кромок (кромки бленды будут рассматриваться отдельно).

док. Однако обеспечить защиту такого покрытия от механических повреждений и загрязнений при всех процедурах работы с блендой – сборка прибора, наземная отработка, отработка в составе КА – технологически сложнее. Кроме того, для успешной эксплуатации бленды необходима гарантия сохранения свойств покрытия при эксплуатации прибора в достаточно агрессивных условиях открытого космического пространства: радиационного излучения широкого спектра и термоциклирования.



Рис. 2. Конструкции бленды для угла допустимой засветки 22°: а – однокаскадной классической; б – бленды с коническими диафрагмами

Наиболее реальным на данном этапе выглядит путь оптимизации геометрической формы бленды с использованием апробированного лакокрасочного покрытия. Оптимизация конструкции сводится к использованию свойств однокаскадной бленды и диффузных ламбертовских поверхностей. Чем выше бленда, тем больше ее коэффициент подавления. Помимо этого, используя свойства ламбертовской поверхности, можно перераспределить световую энергию в бленде так, чтобы на первую линзу объектива после двух рассеяний попадала меньшая доля всего потока. Это достигается изменением формы диафрагм (см. *puc. 26*). Следует заметить, что на *puc. 2* бленды незначительно отличаются по высоте, это различие образуется из-за конической формы диафрагм бленды. Сравнение двух бленд с расположением кромок диафрагм на одной высоте наиболее корректно, т.к. обеспечивает одинаковое распределение потока боковой засветки в соответ-

ствующих отсеках бленды. Согласно моделированию и теоретическому расчету, получаем выигрыш в коэффициенте подавления всей бленды от изменения угла наклона диафрагм приблизительно в 2 раза.

Теоретический расчет и результаты измерения допустимого уровня паразитной засветки фотоприемного устройства

При оценке допустимого фона на ФПУ приходится руководствоваться не только доступной потенциальной ямой устройства, но и ограничением на шумовую составляющую, поскольку при увеличении фона растет и фотонный шум. При критическом значении фотонного шума СКО фона на кадре может быть настолько велико, что полезный сигнал потонет в шуме, и звезда не будет распознана как объект.

Для определения необходимого коэффициента подавления бленды примем следующие предположения:

- фон не должен превышать 50% используемой потенциальной ямы ПЗСматрицы (с учетом применяемого АЦП);
- звезда распознается как объект в том случае, когда 1/σ > 20 (условие возникает из алгоритма обработки и распознавания полученных изображений участков звездного неба при расфокусировке изображения звезды на 3× 3 пикселя), где *I* интегральная яркость звезды на кадре без паразитной засветки (суммарное количество фотонов, пришедших от звезды в поле зрения объектива, с учетом квантовой эффективности ПЗС-матрицы); σ среднеквадратичное отклонение (СКО) яркости фона в пикселях по кадру.

Среднеквадратическое отклонение определяется как:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{np}^{2} + \sigma_{\phi}^{2}},$$

где σ_{np} – СКО приборного шума (на темновом кадре); σ_{ϕ} – СКО фотонного шума:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\Phi_{\varphi^{_{III}}}}$$
 ,

где $\Phi_{_{\phi m}}$ – составляющая фона, определяющаяся уровнем засветки.

Среднее допустимое значение фона Ф на кадре можно вычислить по формуле:

$$\Phi = \Phi_{\text{duu}} + \Phi_{\text{T}},$$

где $\Phi_{\rm T}$ – сигнал на темновом кадре. Все величины измеряются в количестве электрон на 1 пиксель ПЗС-матрицы.

Для ПЗС-матрицы «Сфера 1000» (размер матрицы 1024 × 1024 пикселя, размер пикселя 16 × 16 мкм), 12-разрядного АЦП, объектива «Астрар-8» (f = 60 мм, относительное отверстие 1:2) при времени экспонирования кадра 120 мс критичным ограничением является допустимое отношение сигнал/шум (потенциальная яма матрицы составляет 40 тыс. электрон). СКО приборного шума на темновом кадре составляет порядка 40 электрон. В этом случае звезду звездной величины 6,2 на кадре (интегральный сигнал звезды класса А равен 7,7 тыс. электрон) уже нельзя распознать при фоне 15 тыс. электрон на пиксель.

Измерения на имитаторе одной звезды с разным уровнем фоновой засветки для системы объектив-ПЗС-матрица позволяют установить, как изменяется точность распознавания координат энергетических центров звезд при увеличении среднего значения фона на кадре. На *рис. 3* показана зависимость СКО определения центра звезды при разном фоне. Видно, что теоретический расчет значения допустимого фона для визирования звезд согласуется с результатами измерений.



Рис. 3. Зависимость СКО определения энергетического центра звезды от среднего уровня фона на кадре для звезд 4,2-й и 6,2-й звездной величины. В области А прибор работает без потери точности; в области **Б** звезды распознаются, но точность определения геометрического центра звезды хуже, чем в области А; в области **В** звезды с малым блеском, по которым определяется ориентация, уже не распознаются на кадре как объекты

Таким образом, взяв Солнечную постоянную в качестве значения освещенности входного отверстия бленды (в первом приближении, без учета угла засветки) и допустимое значение освещенности на ПЗС-матрице (значение с графика на *рис. 3* - граница зон Б и В), легко определить необходимый коэффициент подавления системы бленда-объектив для успешного определения ориентации по звездам с наименьшим блеском:

$$k = \frac{E_{\Theta}}{E_{\Pi 3C-Mampulus}} = \frac{1.1 \cdot 10^{11} \phi om / (p^2 \cdot c)}{1.5 \cdot 10^4 \phi om / (p^2 \cdot c)} = 7.3 \cdot 10^6,$$

где p^2 - площадь одного пиксела ПЗС-матрицы. Для определения геометрических центров звезд без потери точности (значение с графика на *рис. 3* - граница зон А и Б), необходим коэффициент подавления

$$k = \frac{1.1 \cdot 10^{11} \phi om / (p^2 \cdot c)}{4.8 \cdot 10^3 \phi om / (p^2 \cdot c)} = 2.3 \cdot 10^7.$$

Измерение коэффициента подавления оптической системы звездного датчика

Фотометрический расчет оптической системы в первых приборах звездной ориентации осуществлялся вручную, в результате можно было дать оценку коэффициента подавления по порядку величины. Применение компьютерного моделирования позволяет получить более точное значение. При этом необходимо построить адекватную модель, максимально приближенную к реальной по таким характеристикам как геометрия и оптические свойства поверхностей. Для задания оптических свойств поверхностей модели необходимо провести ряд измерений. Требуется определить коэффициент рассеяния диффузного покрытия, индикатрису рассеяния на кромках диафрагм и коэффициент подавления объектива.

В однокаскадной бленде доля засветки объектива светом, рассеянным на кромках диафрагм, всегда считалась критической, поскольку уже после первого рассеяния свет попадает на первую линзу. Поэтому первоначально была выбрана конструкция двухкаскадной бленды, где этой составляющей попросту нет. Одним из вариантов уменьшения составляющей рассеяния на кромках считалась их острая заточка до 2...5 мкм, таким образом, уменьшается площадь освещенной поверхности кромки. Однако появляется сложность при нанесении покрытия, которое осыпается с края, и в результате получается тонкая кромка чистого металла. В целях облегчения конструкции диафрагмы и боковая поверхность бленды изготавливаются из достаточно легкого сплава алюминия и магния, заточить который остро нельзя, в результате, диаметр скругления кромок диафрагм бленд составляет 70 мкм. При этом она имеет равномерное черное покрытие.

В результате измерений получилось, что кромка светит как цилиндрическая поверхность высотой 10 мкм, полностью покрытая черной краской. При такой толщине кромки однократное рассеяние на кромках нескольких диафрагм не приведет к засветке изображения.

Моделирование и фотометрический расчет с использованием результатов оптических измерений. Измерение коэффициента подавления бленды и подтверждение корректности используемой модели

Коэффициент подавления бленды можно рассчитать, используя программу для моделирования оптических систем и трассировки лучей (авторами использовалась программа Trace Pro). Задав характеристики источника света, распределение освещенности на входном отверстии бленды и свойства поверхностей оптической системы, можно получить распределение освещенности на первой линзе объектива.

Полученные значения коэффициентов подавления с коническими диафрагмами приведены в *табл. 1* (для сравнения даны расчетные значения коэффициентов).

φ,°	k _{расч.}	k _{изм.}
25	4,8E+04	7,3E+04
30	1,0E+05	1,3E+05
35	1,4E+05	1,4E+05
40	1,8E+05	1,5E+05
45	2,2E+05	2,0E+05
60	2,6E+05	2,2E+05

Таблица 1. Расчетные и измеренные коэффициенты подавления бленды с коническими диафрагмами

Коэффициент подавления объектива определялся как отношение освещенности первой линзы объектива, созданной источником, находящимся вне поля зрения прибора, к освещенности ПЗС-матрицы. Согласно измерениям коэффициент подавления объектива колеблется в пределах от 10 при угле засветки близком к углу поля зрения прибора до 100000 при больших углах.

Моделирование прохождения света через систему бленда-объектив позволяет оценить уровень фона на ПЗС-матрице, т.е. перевести входной световой поток в бленду в градации АЦП на изображении. Следует заметить, что бленда с конической формой диафрагм по габаритам не больше классической однокаскадной бленды с углом допустимой засветки 22° для заданных поля зрения прибора, диаметра входного отвертия объектива и угла допустимой засветки, т.е. невозможно геометрическим построением уменьшить конструкцию круговой бленды при любых покрытиях. Дальнейшее физическое уменьшение габаритов бленды возможно только за счет увеличения угла допустимой засветки, что во-первых, сократит область работоспособности прибора и, во-вторых, не приведет к повышению светозащищенности ПЗС-матрицы прибора. В *табл. 2* приведены расчетные коэффициенты подавления разных бленд в результате численного моделирования и соответствующие средние значения фона на кадре для одного прибора с учетом коэффициента подавления бленды и объектива.

Угол за-	Вариант конструкции бленды, габариты												
светки ф, град	двухкаскадная, 390×200 мм		однокаскадная классическая для угла допустимой засветки 30°, 170×110 мм		однокаскадная классическая для угла допустимой засветки 22°, 240×120 мм		однокаскадная с коническими диафрагмами, 250×120 мм		со сферическими диафрагмами, боковая поверх- ность стеклян- ная, 210×122 мм		со сферическими диафрагмами, боковая поверх- ность диффузная, 210×122 мм		
	k _{pacy}	Ne	k _{pac4}	Ne	k _{pacy}	Ne	k _{pacy}	Ne	k _{pacy}	Ne	k _{pacy}	Ne	
25	2,3E+05	790			4,9E+04	3940	7,3E+04	2660					
30	9,2E+08	0	2,1E+04	9250	6,1E+04	3170	1,3E+05	1490	6,0E+06	30	3,7E+05	520	
35	4,5E+08	0	2,9E+04	6700	7,6E+04	2550	1,3E+05	1490	4,3E+06	50	2,4E+05	760	
40	6,3E+08	0	3,3E+04	5880	9,4E+04	2060	1,5E+05	1370	3,4E+06	60	1,3E+05	1490	
45	4,0E+09	0	4,2E+04	4620	9,5E+04	2040	2,0E+05	970	3,2E+06	60	1,9E+05	1020	
60	5,4E+09	0	7,3E+04	2660	1,2E+05	1540	2,2E+05	830	3,5E+06	60	3,5E+06	60	

Таблица 2. Расчетные средние значения фона на кадре для одного прибора звездной ориентации

Примечание: $k_{pacy.}$ – расчетный коэффициент подавления бленды; N_e – количество электронов на один пиксел ПЗС-матрицы за время экспонирования 120с (с учетом коэффициента подавления объектива)

Из *табл. 2* видно, что двухкаскадная конструкция полностью подавляет боковую засветку (первый вариант), два последние варианта с зеркальными покрытиями, пока технологически не осуществимы. Классическая однокаскадная бленда не позволяет получить должное подавление, согласно расчету такая бленда приведет к понижению точности определения геометрического центра звезды (второй вариант). Уменьшение минимально возможного угла засветки (третий вариант), дополненное изменением формы диафрагм (четвертый вариант), обеспечивает необходимый коэффициент подавления системы бленда-объектив порядка 10⁷, при котором распознавание положения звезд, а значит и определение ориентации происходит без потери точности.

Заключение

В статье показано, что доработка конструкции диафрагм бленды при использовании типового лакокрасочного покрытия позволяет уменьшить габариты прибора, сохранив необходимое значение подавления боковой засветки.

Разработана методика расчета, позволяющая оценить уровень допустимой засветки на основе данных, полученных с помощью существующего программного обеспечения приборов звездной ориентации. В результате применения моделирования была найдена оптимальная форма диафрагм в классической однокаскадной бленде в виде конических поверхностей. Согласно проведенным измерениям коэффициента подавления макета новой конструкции бленды с коническими диафрагмами приближение построенной расчетной модели и результаты аналитического расчета согласуются с реальными характеристиками.

Литература

- 1. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976. С. 43-61.
- 2. Аванесов Г.А., Балебанов В.М., Зиман Я.Л., Сычев А.Г., Тарнопольский В.И., Федотов В.И. Выбор параметров аппаратуры оперативного определения ориентации космического аппарата по изображениям звезд //В кн.: Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. М.: Наука, 1983.
- Ваваев В.А., Бессонов Р.В. Об измерительных свойствах камеры на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) //Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конфереции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», Таруса, 13-16 сентября 20я10. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 40.
- 4. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. С. 110-131.

Development of effective light-protective baffle construction for star tracker

O.V. Filippova, R.V. Bessonov, G.A. Avanesov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia E-mail: philippova.ov@gmail.com

This article describes the construction principles of a star tracker's light-protective baffle, as well as methods to improve its geometric design. The available ways to enhance the suppression due to changes in manufacturing technology of the baffle are analyzed. A brief description of the historical development path of the light-protective baffle design and the main problems that had to be overcome to ensure the proper side illumination suppression are presented.

The role of the star tracker's optical elements in suppressing side illumination is described. The results of researching the star tracker's light-protective system, as well as theoretical and experimental determination of the side illumination acceptable level depending on hardware and software being used are given. The possibilities for further development of light-protective system in order to improve star tracker's performance are described.

The experimental part of the work consists in measuring the diffuse ratio of different coatings, dissipation at the edges of the baffle diaphragm, side illumination suppression ratios of lens and baffle. Measurements confirming the correctness of the theoretical model and consistent with the simulation results were carried out.

Keywords: star tracker, baffle, suppression ratio, luminance distribution, side illumination, attitude control, illumination angle, edge of diaphragm.

References

- 1. Landsberg G.S., Optika (Optics), Moscow: Nauka, 1976, pp. 43-61.
- 2. Avanesov G.A., Balebanov V.M, Ziman Ya.L., Sychev A.G., Tarnopol'skii V.I., Fedotov V.I., Vybor parametrov apparatury operativnogo opredeleniya orientatsii kosmicheskogo apparata po izobrazheniyam zvezd (Selecting instrumental parameters for operational determination of spacecraft attitude orientation based on stars images), In: *Optiko-elektronnye pribory v kosmicheskikh eksperimentakh* (Electricooptical devices in space experiments), Moscow: Nauka, 1983.
- Vavaev V.A., Bessonov R.V., Ob izmeritel'nykh svoistvakh kamery na osnove priborov s zaryadovoi svyaz'yu (PZS) (On measuring characteristics of a camera based on CCD-matrix), Vtoraya vserossiiskaya nauchnotekhnicheskaya konferetsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmichesikh apparatov" (The 2nd all-Russian Scientists Conference "Current Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Tarusa, 13-16 September 2010, Book of abstracts, Moscow: IKI RAN, 2010, p. 40.
- 4. Yakushenkov Yu.G., Lukantsev V.N., Kolosov M.P., *Metody bor'by s pomekhami v optiko-elektronnykh priborakh* (Noise control methods in electrooptics devices), Moscow: Radio i svyaz', 1981.